

### *Выводы*

Таким образом, представленная методика позволяет рассчитать мощность для заданных параметров режимов резания, сравнивать результаты расчета с мощностью, полученной в натурных экспериментах при этих же режимах, верифицировать расчетную модель, а затем использовать расчетную модель для получения значений мощностей, при комбинации параметров, для которых не производились натурные испытания. Если проводить расчеты при одном изменяющемся параметре, зафиксировав остальные, то получаются данные, позволяющие строить графики зависимости мощности от значений этого параметра.

В программе EXCEL такой график можно аппроксимировать аналитической зависимостью. Аналитические зависимости можно использовать в системах оптимизации режимов резания с критерием оптимизации по мощности резания.

### **Библиографический список**

1. Huang J.M. An Evalution of Chip Separation Criteria for FEM Simulation of Machining // Journal of Manufacturing Science and Engineering. 1996. Pp. 545–554.
3. Методика моделирования процесса механической обработки древесных материалов фрезерованием в пакете LS-DYNA / В.В. Раповец, А.А. Гришкевич, С.В. Медведев, Г.Г. Иванец // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: труды X Междунар. евразийск. симпозиума. Екатеринбург, 2015. С. 170–176.
4. Вычислительные эксперименты высокоскоростной лезвийной обработки древесины / В.В. Раповец, И.К. Клепацкий, С.В. Медведев, Г.Г. Иванец // Труды БГТУ. 2017. № 2 (198): Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 360–364.

**УДК 676.05(06)**

**В.П. Сиваков, С.Н. Вихарев**  
(V.P. Sivakov, S.N. Vikharev)  
(УГЛТУ, г. Екатеринбург, РФ)

E-mail для связи с авторами: sivakov.vp@yandex.ru

### **ОБОСНОВАНИЕ РЕМОНТА ОБОРУДОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЦЕЛЛЮЛОЗЫ И ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ МАССЫ МЕТОДАМИ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ**

### **THE RATIONALE FOR THE REPAIR OF EQUIPMENT THE PRODUCTION OF CELLULOSE AND THERMO MECHANICAL PULP METHODS OF TECHNICAL DIAGNOSTICS**

*В работе рассмотрены модели обоснования ремонтов оборудования производства целлюлозы и термомеханической массы. Показано, что модель обоснования ремонтов на основе диагностирования технического состояния узлов элементов обладает существенным преимуществом, так как в этой модели не применяют событие «отказ» оборудования. Оценку работоспособного состояния оборудования производят в режиме эксплуатации с некоторым запасом по времени до события «отказ». Предложено при диагностировании сложные объекты условно расчленять на элементы, а элементы – на узлы. Такой подход позволяет по параметрическому диагнозу узлов производить последующие непараметрические диагнозы элементов. Показано, что при*

трехуровневой оценке диагноза узлов можно выявлять как предотказное состояние узлов, так и предотказное состояние элементов.

*The paper considers the models of justification of repairs of equipment for the production of cellulose and thermomechanical mass. It is shown that the model of justification of repairs on the basis of diagnosing the technical condition of the components of elements has a significant advantage, since this model does not apply the event of «failure» of the equipment. Evaluation of the equipment operating condition is carried out in operation mode with a certain margin of time before the event «failure». It is proposed to classify complex objects into elements and elements into nodes. This approach allows for the parametric diagnosis of nodes to produce subsequent nonparametric diagnoses of elements. It is shown that under a three-tier evaluation of the diagnosis sites, you can identify how prefailure the state of nodes and prefailure the state of the elements.*

Планово-предупредительные ремонты (ППР) оборудования производства целлюлозы (ОПЦ) и термомеханической массы (ТММ) корректируют методами технической диагностики. Современный уровень накопления и применения информации о техническом состоянии (ТС) оборудования характеризуется эволюционным переходом от режима технического обслуживания «ППР» к режиму технического обслуживания «ремонт по ТС» (рис. 1).

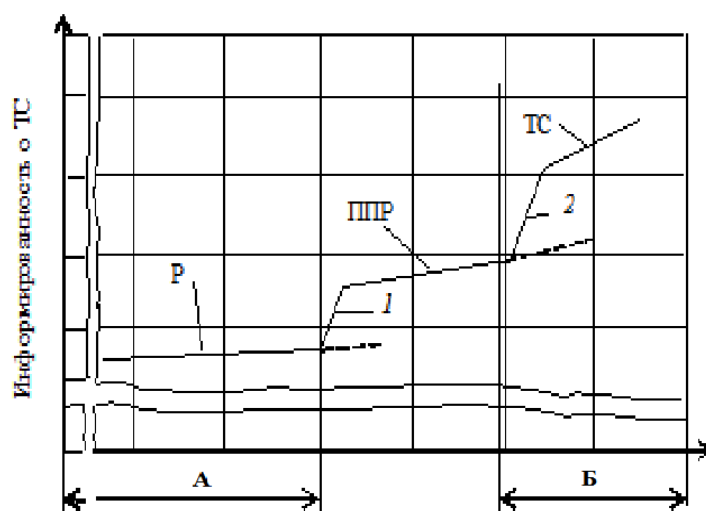


Рис. 1. Инвариантный график накопления информации о ТС оборудования:  
А – период применения модели отказов; Б – период применения диагноза ТС;  
Р – ремонт по отказам; ППР – по анализу периодичности отказов; ТС – по диагнозу ТС;  
1, 2 – переходы от одного уровня накопления информации к другому уровню

Инвариантный график показывает, что каждый последующий этап в развитии технического обслуживания ОПЦ и ТММ базируется на предыдущем. Скачкообразные переходы к более качественным методам обслуживания обусловлены уровнем накопления и качеством информации о ТС оборудования. Временные участки установившейся подконтрольной эксплуатации ОПЦ и ТММ при более качественном обслуживании отличаются повышенным трендом.

В настоящее время в ЦБП сохраняются все виды технического обслуживания с преобладающей тенденцией перехода к ремонтам оборудования по ТС. Состояние оборудования исследуется методами машиноведческих наук «Надежность машин» и «Техническая диагностика».

Одной из задач исследований работоспособного состояния является обоснование ремонтов оборудования по состоянию. При решении этой задачи в теории надежности и технической диагностике сформировались специфические особенности.

#### *Иерархическая структура оборудования*

В теории надежности при исследовании видов ТС технологическое оборудование условно расчлняют на *иерархии* объектов, объекты, элементы (составные части объектов). Элемент классифицируется как простейшая машина, реже как механизм, имеющие не менее двух состояний функционирования, например, работоспособное и неработоспособное. Разделение элементов на диагностируемые узлы не производится.

В технической диагностике при исследовании видов ТС производится расчленение элементов на диагностируемые узлы, то есть на составные части нижнего уровня градации, принятой в теории надежности. Диагностируемый узел – часть элемента, которую не требуется детализировать при диагностировании ТС в режиме эксплуатации. По результатам диагноза узлов оценивают ТС элемента в целом.

Единый переход к градации технологического оборудования по структурным подуровням не выработан, что сдерживает формирование общей методики исследования ТС объектов. Для обоснования технического обслуживания ОПЦ и ТММ по состоянию предлагается следующая иерархическая структура (рис. 2).

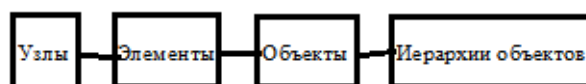


Рис. 2. Структура для обоснования обслуживания ОПЦ и ТММ

Предложенная иерархическая структура расширяет градацию составных частей оборудования до диагностируемых узлов.

#### *Модели исследования диагностических признаков*

В теории надежности работоспособное состояние контролируют по модели отказов [1]. Отказ как событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта, занимает переходное положение между работоспособным и неработоспособным состояниями (рис. 3).

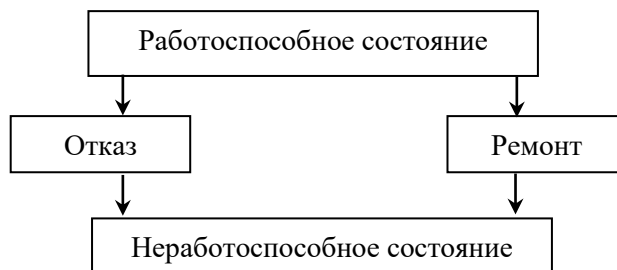


Рис. 3. Модель отказа и восстановления элемента

Решение задач диагностирования по модели отказа связано с прогнозированием надежности на период до следующего осмотра. С помощью моделей отказа определяются временные эксплуатационные характеристики: наработка до отказа, остаточный ресурс и др.

Результаты исследования отказов используются в виде генеза по отношению к работоспособности объекта. По анализу отказа восстанавливают состояние, в котором объект находился в некоторый предшествующий момент, определяют причины возникновения отказов, что важно для недопущения подобных отказов в будущем. По модели отказов непосредственного измерения количественных характеристик работоспособного состояния узлов элемента не производится. Результаты анализа отказов применяют при разработке ППР. Однако из-за отсутствия в модели отказов элементов диагноза ее нельзя использовать для оперативного контроля работоспособного состояния.

В технической диагностике измерение диагностических признаков узла эксплуатируемого элемента производится, как правило, для работоспособного состояния (рис. 4).



Рис. 4. Модель диагностирования ТС узла элемента

Отметим, что в модели диагностирования исключено событие «отказ». По диагностическим признакам производится оценка уровня работоспособности узла элемента. В качестве допустимых уровней работоспособного состояния используются нормы, характерные для нового оборудования; нормы, заложенные в диагностической аппаратуре; нормы, разработанные при подконтрольной эксплуатации оборудования. Диагностические признаки, не соответствующие допустимому уровню, показывают, что резерв времени работоспособного состояния узла элемента ограничен, однако достаточен для уточнения диагноза и принятия решения по выводу на ремонт по состоянию.

При диагностировании в рабочем состоянии объект не выводят из эксплуатации, при других видах диагностирования эксплуатационный режим временно прерывается.

Техническое диагностирование, в частности вибрационное, имеет ряд нерешенных проблем. Обычно диагнозу подвергаются составные части элементов машин: механизмы, детали (далее узлы). Диагностируемые узлы контролируются автономно.

Влияние ТС одного узла на ТС других узлов элементов машины, а также на ТС элементов машины в целом мало исследовано. Опыт переноса практики диагностирования узлов для контроля ТС элементов машин, сложных объектов оказался малоэффективным.

При диагнозе элементов и сложных объектов информации о неисправностях отдельных узлов оказалось недостаточно для обоснования ремонтов по состоянию. Необходимо определить общее ТС элемента, объекта, проанализировать возможные переходы в другие состояния, определить объемы ремонтных работ и время их проведения.

Сочетание методов технической диагностики раннего обнаружения неисправности узлов, элементов с методами «Надежности машин» по обоснованию технического обслуживания элементов и объектов является актуальным при переходе к ремонтам по ТС.

#### *Связь параметрического диагноза ТС узлов и непараметрического диагноза ТС элементов, объектов*

При диагностировании элементов сложных объектов для оценки ТС отдельных узлов элементов оборудования приходится применять различные виды диагностической аппаратуры. Например, для диагностирования оборудования производства целлюлозы и термомеханической массы применяются виброизмерительные приборы для определения среднеквадратических параметров вибрации, анализаторы спектра измеряемых частот, ультразвуковые, температурные приборы. Для формирования диагностической оценки элемента диапазоны параметрических оценочных критериев узлов данного элемента разделяются на подуровни:  $[Ф]$  – «допустимо»;  $ФН$  – «неудовлетворительно»;  $ФП$  – «предотказно».

На рисунке 5 показаны подуровни  $[Ф]$ ,  $ФН$  и  $ФП$  для диагноза виброскорости с учетом изменения за период наработки. Измеренные при диагностировании значения уровней диагностического параметра обрабатывают методами математической статистики. Например, параметры вибрации (рис. 5) исследуют как случайные переменные вибрации. Для выборки измеренных значений параметров вибрации определяют закон распределения и среднее квадратическое отклонение. Определение допустимых вибрационных критериев обосновывают с применением нулевой и альтернативной гипотез [2].

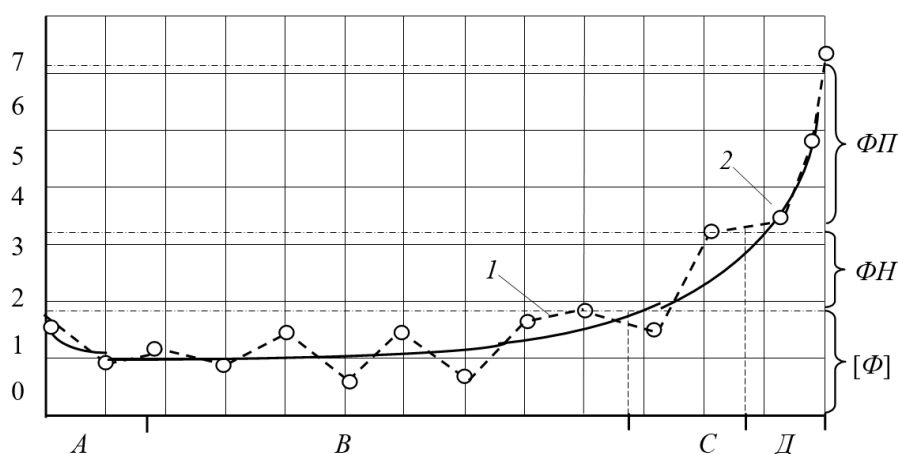


Рис. 5. Графики зависимости виброскорости подшипниковой опоры циркуляционного насоса от наработки: 1 – экспериментальный; 2 – идеализированный; A, B, C и D – зоны приработки установившегося режима, появления и ускоренного развития дефекта соответственно;  $[Ф]$ ,  $ФН$ ,  $ФП$  – уровни оценок «допустимо», «неудовлетворительно», «предотказно» соответственно

Критическая статистика для проверки гипотез принималась в зависимости от однородности значений  $\Phi_i$  в выборке по  $\tau$ -распределению максимального отклонения. Оценка критической статистики  $\tau$ -распределения определялась по формуле:

$$\hat{\tau} = \frac{|\Phi^n - \bar{\Phi}|}{\sigma_{\Phi}}, \quad (1)$$

где  $\Phi^n$  – элемент, исключаемый из однородной выборки;

$\Phi^n \in \{\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n\}$ ;

$\bar{\Phi} \in (\bar{S}_e, \bar{V}_e, \bar{T})$  – среднее арифметическое значение выборки;

$\sigma_{\Phi}$  – среднее квадратическое отклонение;

$n$  – число значений  $\Phi_i$  в выборке;  $i = 1 \dots n$ .

Граничное значение  $\tau_{\alpha}$  определялось по таблице квантилей  $\tau$ -распределения при уровнях значимости 5–10 % (вероятность отвергнуть нулевую гипотезу составляла 5–10 %). Нулевая гипотеза принималась для однородных выборок при  $\bar{\tau} \geq \tau_{\alpha}$ . Допустимые пределы вибрации определялись по формуле [3,4]:

$$|\Phi| = \bar{\Phi} \pm \tau_{\alpha} \sigma_{\Phi}, \quad (2)$$

где знак «+» принимался при возрастании вибрационной функции за период наработки контролируемого узла, знак «–» – при снижении.

Параметры ФН (вибрация неудовлетворительная) и ФП (вибрация предотказного состояния) определялись по зависимостям:

$$\Phi_H = \bar{\Phi} \pm k_n \tau_{\alpha} \sigma_{\Phi}; \quad \Phi_P = \bar{\Phi} \pm k_n k_n \tau_{\alpha} \sigma_{\Phi}, \quad (3)$$

где  $k_n$ ,  $k_n$  – коэффициенты предупредительных границ неудовлетворительного и предотказного состояний соответственно.

Значения  $k_n \approx 1,3$ – $1,4$  и  $k_n \approx 1,1$ – $1,2$  определены из опыта диагностирования.

Сокращенные периоды времени  $\Delta t_{bj}$  и  $\Delta t_{cj}$  между измерениями возрастающей и снижающейся вибрации диагностируемых узлов в состоянии, близком к предотказному, определялись по формулам:

$$\Delta t_{bj} = \frac{|\Phi| \Delta t}{m \Phi_j}; \quad \Delta t_{cj} = \frac{\Phi_j \Delta t}{m |\Phi_j|}, \quad (4)$$

где  $m$  – коэффициент, учитывающий безопасность эксплуатации узла с экстремальными уровнями вибрационной функции;

$\Phi_j$  – экстремальный уровень вибрационной функции узла при  $j$ -м измерении.

Аналогичные подуровни диапазонов оценочных критериев нарабатываются при подконтрольной эксплуатации для всех диагностируемых узлов независимо от вида приборов и измеряемых параметров.

*Выводы*

1. Разработана и обоснована модель диагностирования работоспособного ТС узла.
2. Предложено применять трехуровневую оценку работоспособного ТС узлов при диагностировании, исключающую событие «отказ».
3. Оценочные критерии технического состояния узлов позволяют применять для контроля ТС различные приборы и диагностируемые параметры.

**Библиографический список**

1. Муромцев Ю.Л. Безаварийность и диагностика нарушений в химических производствах. М.: Химия, 1990. 143 с.
2. Сиваков В.П., Вихарев С.Н. Динамика роторов дисковых мельниц // Вестник Казанского технологического университета, 2012. № 6. 4 с.
3. Динамические испытания машин – эффективный метод оценки их технического состояния / С.Н. Вихарев, В.П. Сиваков, Е.Г. Сафронов, Ю.С. Вихарева // Вестник Казанского технологического университета, 2013. № 24. Т. 16. С.102–105.
4. Сиваков В.П., Музыкантова В.И., Гребенчиков М.Ю. Диагностирование засорения сит питателя высокого давления // Лесной журнал. 2015. № 1 (343). С. 144–151.

**УДК 674.055:621.934(043.3)**

**В.В. Чаевский<sup>1</sup>, В.В. Жилинский<sup>1</sup>, А.В. Романовская<sup>1</sup>,  
А.К. Кулешов<sup>2</sup>, Д.П. Русальский<sup>2</sup>**  
(V.V. Chaevskij<sup>1</sup>, V.V. Zhilinskij<sup>1</sup>, A.V. Romanovskaya<sup>1</sup>,  
A.K. Kuleshov<sup>2</sup>, D.P. Rusal'skij<sup>2</sup>)  
(<sup>1</sup>БГТУ, <sup>2</sup>БГУ, г. Минск, РБ)  
E-mail для связи с авторами: chayeuski@belstu.by

**МОДИФИКАЦИЯ ДЕРЕВОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА  
С ТВЕРДОСПЛАВНЫМИ НОЖАМИ  
Ni-УДА/MoN-ПОКРЫТИЕМ**

**MODIFICATION OF WOOD-CUTTING TOOL  
WITH HARD ALLOY KNIVES BY Ni-UDD/MoN-COATING**

*В данной работе исследованы механические свойства (микротвердость, адгезия) двухслойных (УДА)/MoN-покрытий с Ni-ультрадисперсными алмазами на твердосплавных (карбид вольфрама WC – 2 вес. % Co) ножах дереворежущего фрезерного инструмента. MoN-покрытия осаждались методом конденсации вещества из плазменной фазы в вакууме с ионной бомбардировкой (КИБ) на твердосплавные ножи. Ni-УДА слой являлся композиционным содержащим наноалмазы химическим покрытием (КХП), осажденным на образцы с MoN-покрытием с целью увеличения ресурса работы инструмента. Полученное значение критических нагрузок в 40 Н на скретч-треке покрытия свидетельствует о высокой величине адгезии Ni-УДА/MoN-покрытия с подложкой из твердого сплава WC-Co. Благодаря своим высоким механическим свойствам Ni-УДА/MoN-покрытия могут использоваться для увеличения периода стойкости дереворежущего фрезерного инструмента при резании древесно-стружечных плит на станках с ЧПУ.*